



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SVAŘOVÁNÍ PLAZMOU A MIKROPLAZMOU

PLASMA AND MICROPLASMA WELDING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Ryšavý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Radek Ryšavý**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Svařování plazmou a mikroplazmou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Porovnání metod svařování plazmou a mikroplazmou. Výhody a nevýhody jednotlivých technologií, jejich vhodnost pro svařování nerezavějících ocelí v závislosti na jejich chemickém složení a tloušťce.

Cíle bakalářské práce:

Podrobný popis uvedených metod, rozdíly, jejich vhodnost pro svařování nerezavějících ocelí. Základní podmínka korozivzdornosti.

Rozdělení nerezavějících ocelí podle chemického složení, oceli vhodné pro svařování. Princip stabilizace nerezavějících ocelí.

Seznam literatury:

ŽÁK, Jan a Miroslav NOVÁK. Teorie svařování. Brno: Vysoké učení technické, 1988.

HRIVŇÁK, Ivan. Teória zvariteľnosti kovov a zliatin. 1. vyd. Bratislava: Veda 1989. 343 s. ISBN 80-224-0016-5.

KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.

ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-3-2-3

FOLDYNA Václav a kol. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: ZEROSS 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.

TURŇA, Milan. Špeciálne metódy zvarovania. 1.vyd. Bratislava: ALFA. 1989. 384 s. ISBN 80- 05-0009-
-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

RYŠAVÝ Radek: Svařování plazmou a mikroplazmou

První část bakalářské práce je věnována literární rešerši, ve které je popsáno svařování plazmou a mikroplazmou. Je zde vysvětlen princip těchto technologií, typy hořáků a plyny, které do nich vstupují. Porovnání výhod a nevýhod svařování plazmou a mikroplazmou. A následně průmyslová odvětví, ve kterých tyto technologie nachází uplatnění. Druhá část je věnována porovnání dvou svarů. Ty byly provedeny podobnými svařovacími parametry. U obou svarů bylo spočítáno specifické vnesené teplo. Následovalo vyhodnocení metalografické makrostruktury, pomocí které se spočítalo zředění svarového kovu a nakonec proběhlo měření tvrdosti ve třech oblastech svaru: základní materiál, tepelně ovlivněná oblast a svarový kov.

Klíčová slova: Svařování, plazma, mikroplazma, korozivzdorná ocel

ABSTRACT

RYŠAVÝ Radek: Plasma and microplasma welding

The first part of the bachelor thesis is devoted to literary recherche, which describes plasma welding and microplasma welding. Here is explained the principle of these technologies, the types of burners and the gases that enter them. Comparison of advantages and disadvantages of plasma welding and microplasma welding. And consequently the industries in which these technologies are used. The second part is devoted to the comparison of two welds. These were made by similar welding parameters. For both welds the specific heat input was calculated. Subsequent metallographic macrostructure evaluation, which used to calculate the dilution of the weld metal. Finally, hardness measurements were performed in three areas of welding: basic material, heat-affected area and weld metal.

Keywords: Welding, plasma, microplasma, stainless steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RYŠAVÝ, Radek. *Svařování plazmou a mikrop plazmou*. Brno, 2017. 31s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 26. 5. 2017

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce, paní Jarmile Houdkové, panu Ing. Jaroslavu Kubíčkovi a panu Vojtěchu Řiháčkovi za pomoc při experimentu. Dále děkuji své rodině za podporu a trpělivost během celého studia.

OBSAH

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 PLAZMA	10
1.1 Vznik plazmatu	10
2 SVAŘOVÁNÍ PLAZMOU	12
2.1 Princip technologie	12
2.2 Používané plyny	13
2.3 Typy hořáků	14
2.4 Parametry svařování	15
2.4.1 Svařování klíčovou dírkou	15
2.5 Příprava svarových ploch	16
2.6 Svařovací poloha	17
2.7 Srovnání s ostatními technologiemi	17
2.8 Výhody a nevýhody	18
2.9 Oblasti použití	19
3 KOROZIVZDORNÉ OCELI	20
3.1 Feritické chromové oceli	20
3.2 Martenzitické chromové oceli	21
3.3 Austenitické Cr-Ni (Cr-Ni-Mo) oceli	22
3.4 Austeniticko – feritické oceli	22
4 EXPERIMENT	24
5 ZÁVĚRY	31

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

ÚVOD [7], [14], [17], [18], [20]

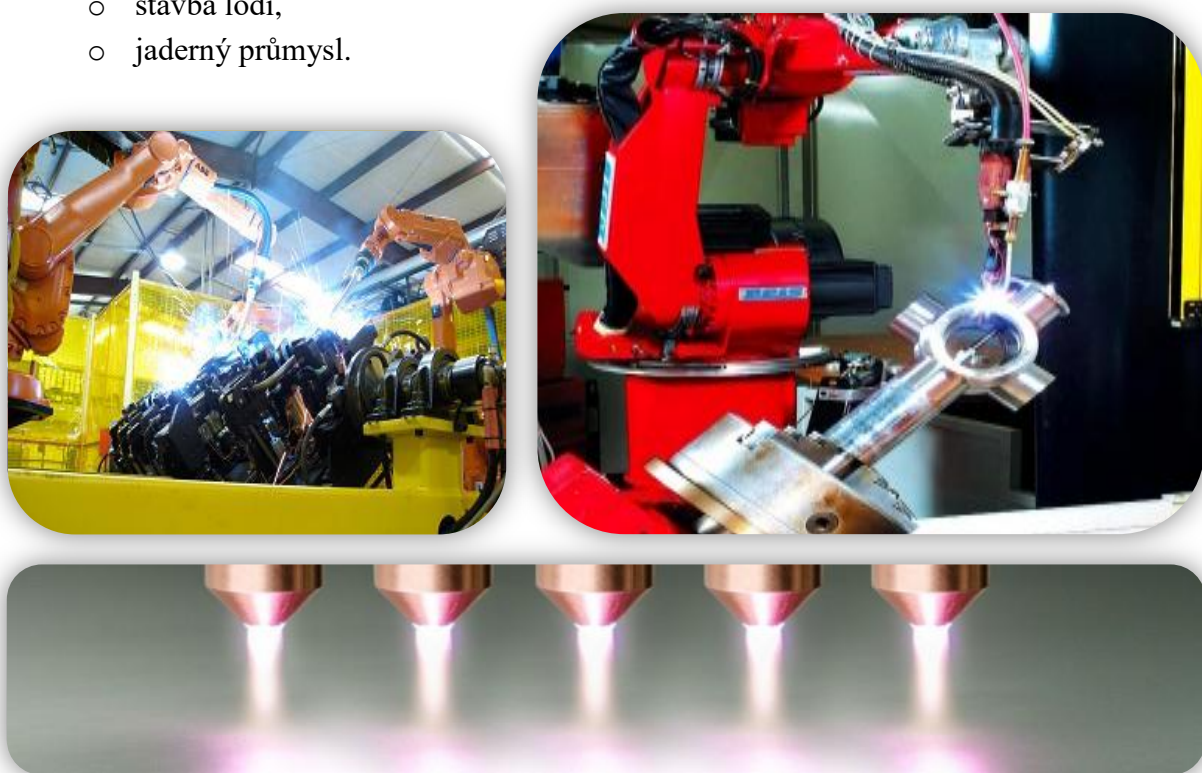
První zmínky o tavném svařování směřují do počátku 19. století. Tehdy byl vynalezen hořák pro kyslíko-vodíkový plamen, a také elektrický oblouk, který dal základ prvnímu svařování ocelí a jiných kovů. Největší rozvoj v oblasti svařování nastal se začátkem první a později druhé světové války, výrobou tanků, letadel nebo lodí.

Vývoj modernějších metod začal ve druhé polovině 20. století, mezi ně se řadí svařování svazkem elektronů, laserovým paprskem a právě plazmou či mikroplazmou.

Postupem času vzniklo mnoho druhů svařování, ale základní rozdělení je do dvou skupin, a to metody tlakového a tavného svařování. Mezi tlakové patří například svařování odporové, ultrazvukové nebo třecí. Skupina tavného svařování obsahuje již zmíněná svařování elektrickým obloukem, plamenem, laserem a plazmou.

Svařování plazmou (obr. 1) se velice podobá metodě TIG (WIG), kde základ tvoří elektrický oblouk. Pro plazmu jsou charakteristické vysoké teploty, dosahují až 30 000 °C. Malá tepelně ovlivněná oblast, malé deformace, vysoká rychlost sváření a kvalita svaru jsou další z mnoha výhod, proč je tato metoda uplatněna v tolika průmyslových odvětvích:

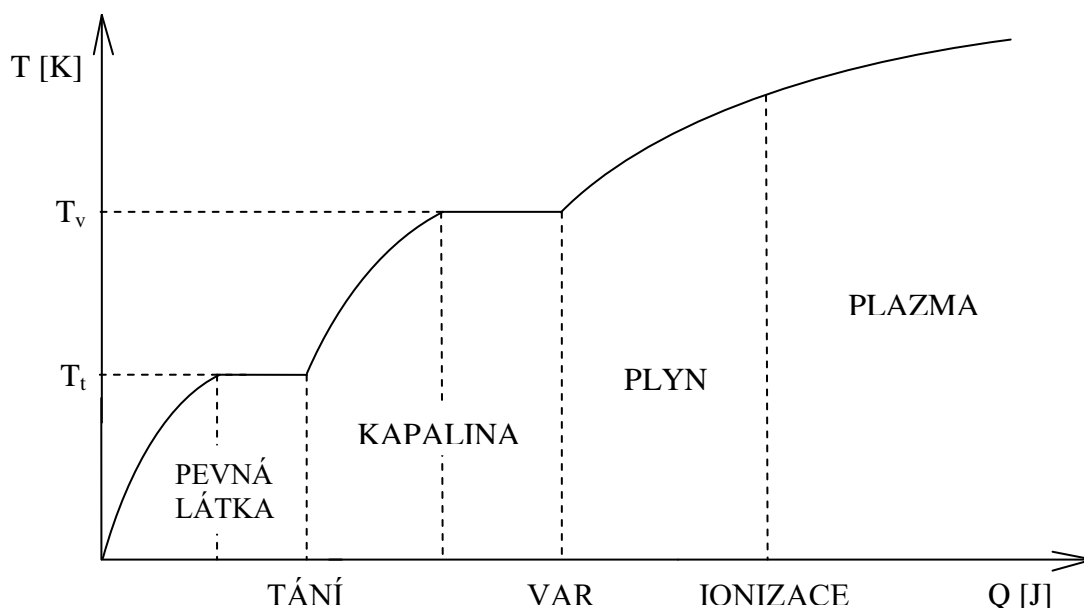
- potravinářství,
- chemický průmysl,
- elektronika,
- automobilový průmysl,
- letecký průmysl,
- stavba lodí,
- jaderný průmysl.



Obr. 1 Svařování plazmou [14], [18], [20]

1 PLAZMA [9], [13], [19], [20]

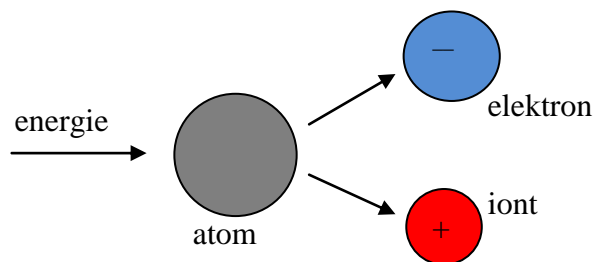
Látky se na Zemi vyskytují v mnoha stavech, mezi nejběžnější se řadí pevné látky, kapaliny a plyny. Fyzikální pojem plazma je považován za čtvrté skupenství látky, ale v přírodě se vyskytuje pouze ve výjimečných případech, např. jako blesk, polární záře nebo plamen. Naopak ve vesmíru plazma tvoří téměř 99% viditelné hmoty, například hvězdy nebo sluneční vítr. Hlavní rozdíl mezi uvedenými stavy, je v hladině jejich energie, viz obr. 2. Jestliže bude působit energie ve formě tepla na nějaký kus ledu, ten pomalu začne tát a postupně se z něj stane voda. Bude-li se pokračovat v zahřívání, voda se odpaří a vznikne pára, tedy plyn. V případě dalšího, ještě většího dodávání energie, může vzniknout plazma.



Obr. 2 Změna stavu skupenství při závislosti teploty na zvyšování energie [19]

1.1 Vznik plazmatu [9], [13], [19], [20]

Z fyzikálního hlediska dochází ke vzniku plazmatu tzv. ionizací plynu, viz obr. 3. Jde o proces, při kterém dodaná energie rozštěpí elektricky neutrální atomy na záporně nabitě částice, elektrony a kladně nabitě částice, tedy ionty. Avšak jako celek je v ustáleném stavu plazma elektricky neutrální. Ionizovaný plyn lze brát za plazma pouze tehdy, vykazuje-li kolektivní chování a kvazineutralitu. Pod pojmem kolektivní chování se rozumí, že plazma disponuje schopností vytvářet globální elektrická a magnetická pole a na tyto globální pole nějakým způsobem zpětně zareagovat. Kvazineutralita znamená, že musí být splněna podmínka, aby v makroskopických objemech dosahovaly částice v průměru zhruba stejného počtu kladně nabitých iontů a záporných elektronů. A s kvazineutralitou úzce koreluje Debyeovo stínění. K Debyeovu stínění dochází v momentě, kdy se v plazmatu vyskytuje pevná látka. Ta má kladný nebo záporný náboj, který je ale zásluhou kvazineutrality plazmatu potlačen do vzdálenosti zvané Debyeova stínící délka, a proto je plazma kvazineutrální. Pro Debyeovu stínící délku λ_D musí platit, že lineární rozměr plazmatu L , je větší:

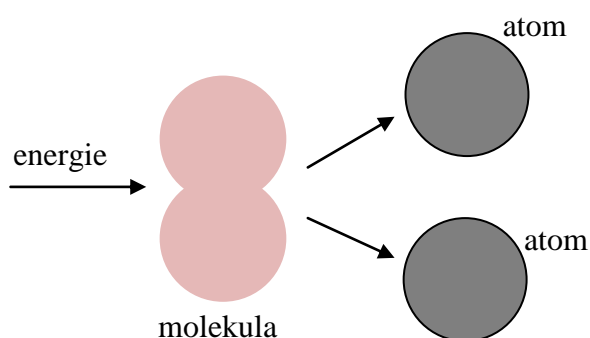


Obr. 3 Ionizace plynu [13]

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \cdot k \cdot T_e}{n_0 \cdot e^2}} \ll L, \quad (1.1)$$

kde: λ_D – Debyeova stínící délka [m]
 ϵ_0 – permitivita vakua [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]
 k – Boltzmannova konstanta [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$]
 T_e – teplota elektronu [K]
 n_0 – koncentrace nabitých částic [m^{-3}]
 e – elementární náboj [C]
 L – lineární rozměr plazmatu [m]

V případě dvouatomových prvků (N_2 , O_2 , H_2) nejdříve proběhne tzv. disociace molekul (obr. 4), neboli rozdělení molekul na jednotlivé atomy a poté již zmíněná ionizace plynu.



Obr 4. Disociace molekul [13]

Velikost ionizace může být různá, a proto se plazma dělí na silně a slabě ionizované. Hlavním kritériem síly ionizace je koncentrace nabitých částic, ta je u slabě ionizovaného plazmatu o něco menší, než hustota neutrálních částic. Důvodem toho jsou srážky převážně částic nabitých s těmi neutrálními. V případě silně ionizovaného plazmatu se neutrální částice téměř nevyskytují, a tak na sebe navzájem působí pouze částice nabitě.

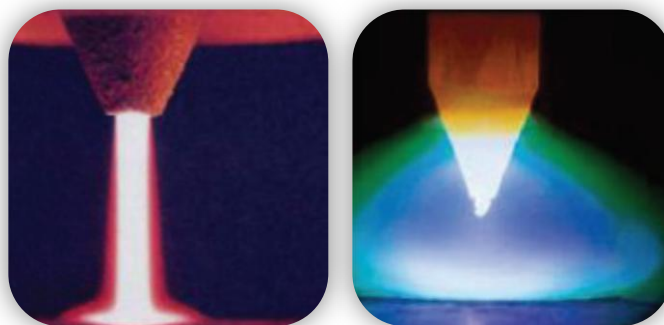
S ionizací úzce souvisí teplota plazmatu, podle které se plazma dělí na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Nízkoteplotního plazmatu se záporným nebo kladným nábojem se docílí v elektrochemickém procesu. Izotermické a neizotermické plazma, je další rozdělení nízkoteplotního plazmatu. Izotermické plazma je charakteristické stejnou teplotou u všech částic, naopak elektrony u neizotermického plazmatu mají daleko vyšší teplotu než neutrální částice. Vysokoteplotní plazma je chápáno jako silně ionizované plazma na základě Sahovy rovnice:

$$\frac{n_i}{n_n} = 2,4 \cdot 10^{21} \cdot \frac{T^{\frac{3}{2}}}{n_i} \exp\left(-\frac{U_i}{k \cdot T}\right), \quad (1.2)$$

kde: n_i – koncentrace ionizovaných atomů [m^{-3}]
 n_n – neutrální atom [m^{-3}]
 T – teplota plazmatu [K]
 U_i – ionizační energie plynu [eV]

2 SVAŘOVÁNÍ PLAZMOU [7], [13], [17], [19]

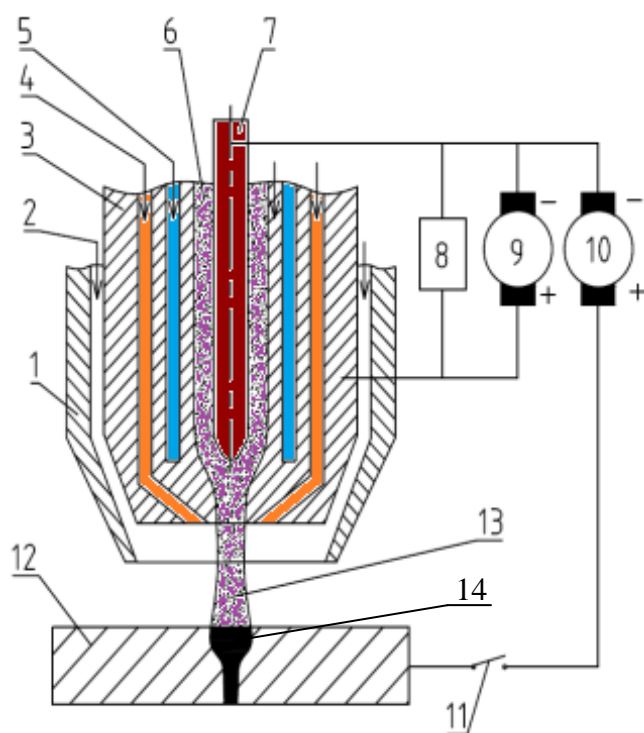
Plazmové svařování (PAW – Plasma Arc Welding) se řadí do skupiny moderního tavného svařování. V základu je velice podobné obloukovému svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře (metoda TIG, viz obr. 5), ale díky dalšímu vývoji a zlepšeným vlastnostem je produktivnější variantou této metody. Lze jej charakterizovat vysokou koncentrací energie a velmi vysokou pracovní teplotou. O zdroj tepla při natavování spojovaných dílů se stará úzký svazek vysokotlakého plazmatu o teplotě 10 000 až 30 000 °C, který z trysky hořáku vystupuje velmi vysokou rychlostí.



Obr. 5 Plazma (vlevo) a metoda TIG [17]

2.1 Princip technologie [7], [12], [13], [17], [19], [21]

Do hořáku (obr. 6) vstupuje disociovaný a vysoce ionizovaný plyn, díky kterému se daří udržet elektrický oblouk stále zapálený. Kolem wolframové elektrody (pozice 7 viz obr. 6) proudí plazmový plyn (6 viz obr. 6), který se vlivem zahřátí oblouku velmi rychle roztahuje, tím pádem se mění v plazma a otvor trysky (3 viz obr. 6) opouští nadzvukovou rychlostí. A právě paprsek plazmatu (13 viz obr. 6) vycházející z hořáku zahřívá materiál (12 viz obr. 6) rychleji, než se teplo stačí odvést kondukcí. Touto příčinou vznikne tavná lázeň. Další plyn (2 viz obr. 6) vstupuje do hořáku k ochraně svarové lázně a k zabránění její oxidaci. Tento proces zaručuje hluboký svar (14 viz obr. 6), dobré formování kořene a typický svarový průřez.



- 1) hubice ochranného plynu
- 2) ochranný plyn
- 3) tryska hořáku
- 4) fokusační plyn
- 5) vodní chlazení
- 6) plazmový plyn
- 7) wolframová elektroda
- 8) zdroj vysoké frekvence (ionizátor)
- 9) zdroj pomocného el. oblouku
- 10) zdroj hlavního el. oblouku
- 11) spínač
- 12) základní svařovaný materiál
- 13) plazmový paprsek
- 14) výsledný svar

Obr. 6 Schéma plazmového hořáku [12]

2.2 Používané plyny [7], [12], [17], [19], [21]

Z hlediska úspory je nejvhodnějším plynem argon, který se často kombinuje s heliem. Směs Ar + 30 % He umožňuje použít menší svařovací proud, což má pozitivní dopad na délku životnosti hořáku a elektrody. Pokud je ve směsi více než 30 % helia, na svařovaný materiál působí větší teplo, a to může mít za následek nadměrnou nebo naopak slabou penetraci. Tyto směsi se používají zejména pro svařování hliníkových součástí do tloušťky 8 mm. Přehled používaných plynů pro plazmové svařování je uveden v tabulce 1.

Tab. 1 Plyny používané pro plazmové svařování [17].

Plyn	Teplota varu [°C]	Ionizační energie [eV]	Chemická aktivita
Vodík	-252,9	13,59	Redukční
Helium	-268,9	24,56	Inertní
Dusík	195,8	14,55	Neredukční
Kyslík	-183	13,62	Oxidační
Argon	-185,9	15,76	Inertní
Oxid uhličitý	-78,5	-	Oxidační

Při svařování plazmou se využívají čtyři druhy plynů:

- plazmové plyny – po přivedení do plazmového oblouku u nich dochází k disociaci a ionizaci, ale pouze část plynu (cca 30 %) se přemění na plazma. Plyn se nesmí dotýkat stěn trysky, a proto polohuje plazmový oblouk tak, aby k tomu nedošlo. Nejběžněji se pro vytvoření plazmového paprsku používá argon (Ar), helium (He), vodík (H₂) a jejich směsi Ar + H₂ nebo Ar + He. Teploty, kterých lze dosáhnout v plazmovém oblouku u jednotlivých plynů jsou uvedeny v tabulce 2. Množství přiváděného plynu je 0,5 až 8 l.min⁻¹ a mění se v závislosti na druhu a tloušťce svařovaného materiálu.

Tab. 2 Teploty v plazmovém oblouku podle složení plazmového plynu [17].

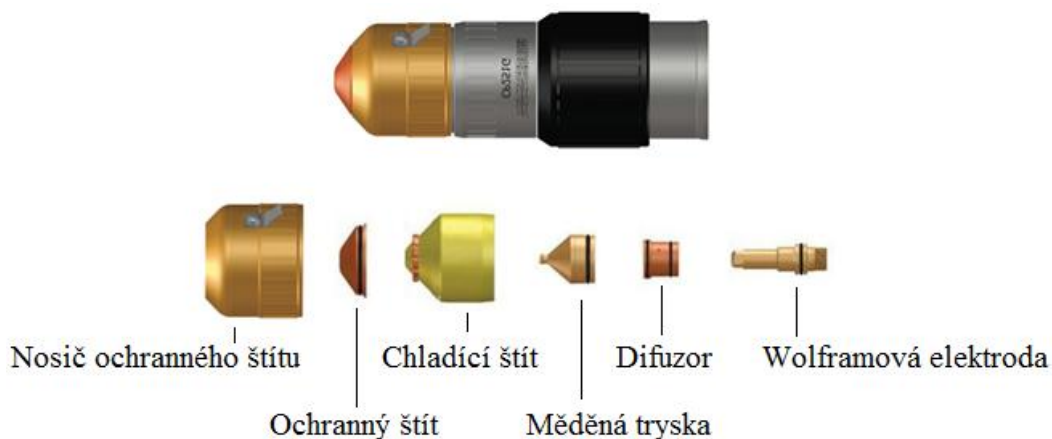
Plyn	Teplota v plazmovém oblouku [K]
Vodík	9 000
Helium	10 000
Dusík	16 000
Argon	20 000
Vodou stabilizovaná plazma	35 000

- fokusační plyny – používá se výjimečně a slouží k fokusaci neboli zaostření paprsku při výstupu z dýzy. Nejčastěji se používá směs Ar + N₂ nebo Ar + H₂ v množství 3 až 15 l.min⁻¹.
- ochranné plyny – jejich funkcí je chránit tavnou lázeň a okolí místa svaru před účinky atmosféry. Opět se používá Ar, Ar + N₂, Ar + H₂ nebo CO₂ v množství 2 až 20 l.min⁻¹.
- formovací plyny – zejména u tupých spojů chrání kořen svaru tzv. záfukem kořene. Nejčastěji se používá plyn na bázi N₂ s 5 až 25 % H₂.

2.3 Typy hořáků [4], [17], [19]

Pro vznik úzkého svazku plazmatu se využívá několik druhů hořáků (obr. 7) s elektrickým obloukem, který je napájen stejnosměrným proudem. Podle typu zapojení se dají rozdělit na hořáky:

- s nepřeneseným obloukem – určen pro svařování elektricky nevodivých materiálů. Elektrický obvod proudu je vytvořen uvnitř plazmového hořáku mezi wolframovou elektrodou (záporný pól) a anodou, kterou tvoří tryska z mědi (kladný pól), pozice 9 viz obr. 6. Měděná dýza zužuje celý elektrický oblouk, tím dochází ke zvýšení koncentrace osového elektrického pole v tryskovém kanálku a následně k velkému ohřátí plazmového plynu, který je zde inertní. Přidáním aktivních plynů by došlo k rychlému opotřebení dýzy. U tohoto typu hořáku je na výstupu pouze horký plazmový paprsek, a proto je hubice hořáku pod velkým tepelným vlivem, takže je nutné, aby byla intenzivně chlazena. Využití hořáku s nepřeneseným obloukem se najde například pro svařování kovových pásek a aplikaci žárových nástřiků.
- s přeneseným obloukem – používá se při svařování elektricky vodivých materiálů. U tohoto typu je elektrický oblouk mezi wolframovou elektrodou (záporný pól) a svařovaným materiálem (kladný pól), neboli anodou, pozice 10 viz obr. 6. Vysokonapěťová jiskra mezi elektrodou a měděnou tryskou v hubici hořáku zajistí zapálení pomocného, tzv. pilotního oblouku. Právě díky pomocnému oblouku dochází k ionizaci plazmového plynu v kanálku dýzy. Kvůli ochraně trysky proti vysoké teplotě je proud pilotního oblouku omezen odporem v rozmezí 10 až 12 A. Ve srovnání s předchozím hořákem má tento většinou větší životnost z důvodu ne tak velkého tepelného namáhání.
- s kombinovaným zapojením – jde o kombinaci obou výše zmíněných způsobů při současném zapojení obou zdrojů, hlavního i pomocného. Pomocný elektrický oblouk vzniká vysokofrekvenčním výbojem mezi wolframovou elektrodou (kladný pól) a měděnou dýzou (záporný pól). Pilotní oblouk zahřívá plazmový plyn v mezeře trysky na potřebnou teplotu, aby plyn vycházel z dýzy ve formě plazmy. Pomocný, někdy také nezávislý oblouk, pomůže ke snadnému vzniku hlavního oblouku. Používá se při nanášení kovových i nekovových prášků na plochy svařovaných materiálů proti tepelnému nebo chemickému namáhání. Nepřenesený oblouk prášek nataví a přenesený plazmový oblouk jej roztaví a spojí se základním materiálem.



Obr. 7 Konstrukce plazmového hořáku [4]

2.4 Parametry svařování [7], [13], [17], [19], [21]

Konečný svar ovlivňuje několik základních parametrů, kterými jsou napětí elektrického oblouku, svařovací proud, rychlost samotného svařování, množství přiváděných plynů, jejich poměr a čistota, typ a tvar wolframové elektrody a pozice hubice hořáku od svařovaného materiálu.

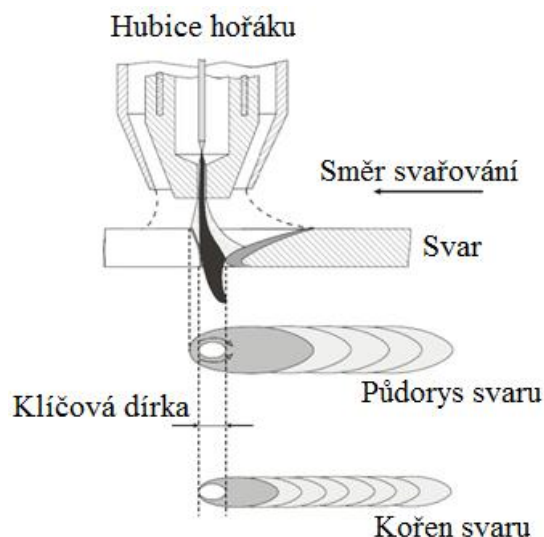
Svařovací proud působí na vlastnosti svaru prostřednictvím paprsku plazmatu a teploty. Čím větší je proud, tím širší je svar jednak na povrchu, ale i u kořene. Podle velikosti svařovacího proudu se dělí svařování na 3 skupiny:

- mikroplazmové svařování: ($I = 0,05 - 20 \text{ A}$),
- středoplazmové svařování: ($I = 20 - 100 \text{ A}$),
- plazmové svařování klíčovou dírkou: ($I > 100 \text{ A}$).

Rychlost toku plazmatu je pevně spjata s kinetickou energií oblouku a ovlivňuje hloubku penetrace. Proto také rychlost toku musí úměrně narůstat při zvětšování tloušťky materiálu i rychlosti svařování. Například při aplikaci směsi $\text{Ar} + 20 \% \text{ He}$ dosahuje rychlost toku plazmového plynu kolem 2000 m.s^{-1} . Když se použije dusík (N_2), rychlost toku se nachází v rozmezí 1500 až 2300 m.s^{-1} .

2.4.1 Svařování klíčovou dírkou [2], [7], [12], [17], [19]

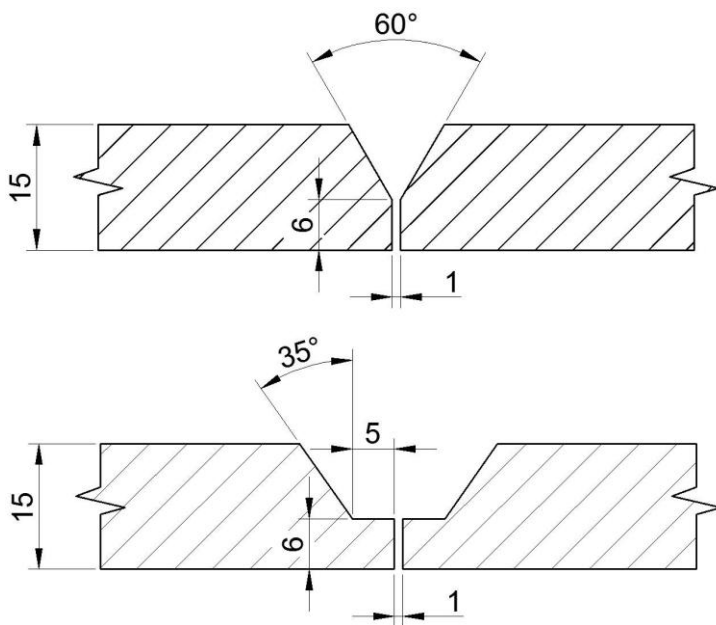
Aby nastalo svařování klíčovou dírkou (keyhole welding), viz obr. 8, musí být svařovací proud větší než 100 A a tloušťka materiálu by se měla pohybovat v rozmezí $3,5$ až 8 mm . Právě u takovéhle tloušťky projde plazmový paprsek celým materiálem a na přední straně tavné lázně vytvoří otvor, tzv. klíčovou díрку (keyhole). K následnému znovuspojení svarového kovu za klíčovou dírkou dojde vlivem povrchového napětí z důvodu posouvání plazmového hořáku ve směru svařování. Při svařování klíčovou dírkou není nutná úprava svarových úkosů u tupých spojů a díky tomu je snížena spotřeba přídavného materiálu na desetinu, v některých případech se svařuje bez přídavného materiálu. Kvůli požadavku rovnoměrné rychlosti a vedení hořáku přesně středem svaru, lze tuto techniku provádět pouze strojně. Z ekonomického hlediska je tato metoda velice výhodná. Průvar se snadno kontroluje, citlivost na změny délky obvodu je minimální a vysoká stabilita oblouku i při nízkých parametrech společně s malou tepelně ovlivněnou oblastí zajišťují kvalitní výsledný svar.



Obr. 8 Svařování klíčovou dírkou [2]

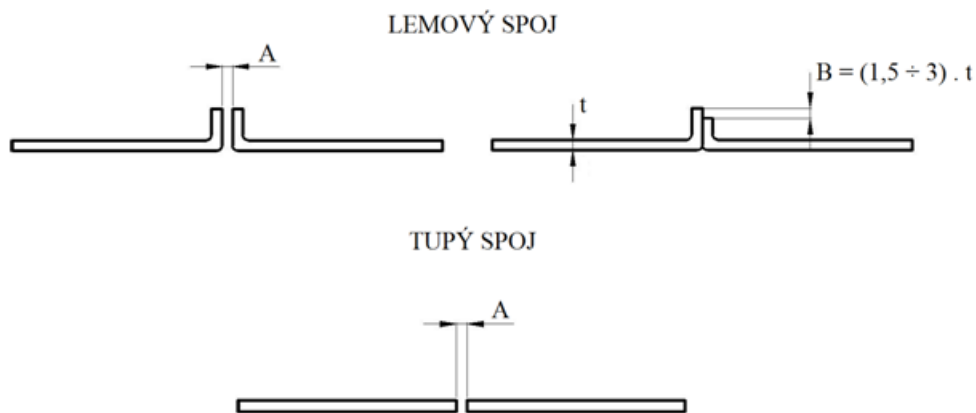
2.5 Příprava svarových ploch [17], [19], [21]

Ještě před svářením se musí očistit základní materiál, to zahrnuje odstranění všelijakých nečistot nebo mastnotu. Pokud by se na materiálu vyskytovaly výstupky nebo větší nerovnosti, lze je odstranit například broušením nebo pískováním. Samotné svařování probíhá v upínáku bez podložení kořene a vzdálenost upínacích čelistí od osy sváření je dána tloušťkou plechu. Do tloušťky 10 až 12 mm a mezerou v kořeni 0,5 až 1 mm, který je chráněn formovacím plynem, nedochází k úpravám svarových ploch u korozivzdorných ocelí. Do 6 mm tloušťky se neupravují svarové plochy nelegovaných a střednělegovaných ocelí. Jestliže je materiál tlustší, je nutné udělat úpravu svarové plochy, viz obr. 9.



Obr. 9 Druhy přípravy svarových ploch [17], [19]

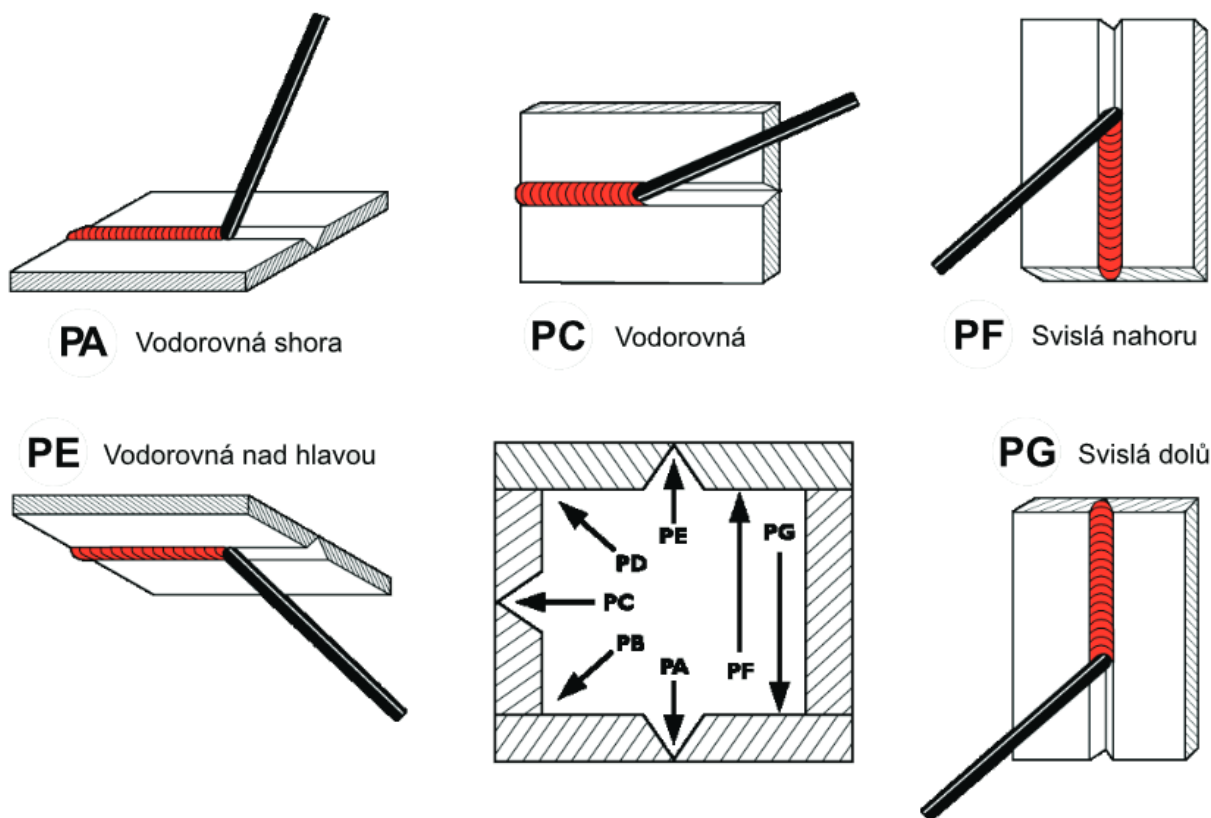
Při svařování mikrop plazmou je příprava náročnější, protože tloušťka materiálu klesá. U tlouštěk v rozmezí 0,3 až 2,0 mm ještě nebývá problém, jelikož šířka mezery mezi svařovanými materiály může nabývat maximálně 20 % tloušťky svařovaného materiálu. Komplikace nastávají u tenkých fólií z korozivzdorných ocelí o síle 0,01 až 0,3 mm. Zde může mezera ve spoji dosahovat maximálně 10 % tloušťky svařovaného materiálu, a proto je nutné pracovat s upínacími pomůckami pro dobrý odvod tepla a zajištění polohy během procesu. Pro tupý spoj se výška lemu doporučuje na 1,5 až trojnásobek tloušťky svařovaného materiálu, viz obr. 10.



Obr. 10 Příprava svarových spojů [17], [19]

2.6 Svařovací poloha [16], [17], [19]

Plazmovým svařováním se nejčastěji spojují tupé svary typu I. Využívá se vodorovné nebo svislé polohy. Nejvíce se používá poloha PA (obr. 11), ale svařuje se i při ostatních polohách, protože kontrola tavné lázně je u nich také bezpečná. Ba dokonce u svislé polohy PF je kontrola ještě spolehlivější než v poloze vodorovné, a to důsledkem směru toku nataveného základního materiálu. Ovšem někdy se svařují tak velké konstrukce, že poloha PA je jediná, která se dá použít. Kupříkladu velké pláty pro nádrže, které se svařují v obrubovacích zařízeních na válečkových dopravnících za pomoci výložníků a sloupů. Často používaná je také poloha ve stěně PC (obr. 11).



Obr. 11 Svařovací polohy [16]

2.7 Srovnání s ostatními technologiemi [7], [17], [19]

V principu je svařování plazmou velice podobné metodě TIG (WIG), kdy plazmový oblouk hoří mezi základním materiálem a netavící se elektrodou. Vše probíhá v ochranné atmosféře inertního plynu. Hlavní rozdíl mezi metodami je, že u plazmy se používá hořák, který má výstupní hubici o menším průměru a navíc intenzivně chlazenou. Ta oblouk zužuje na malou plochu svařovaného materiálu. Ochranný a fokusační plyn pomáhají zvýšit koncentraci energie, která zaručuje hluboké natavení základního materiálu, dobré formování kořene a charakteristický průřez svaru.

Oproti svařování laserovým paprskem má plazmový oblouk sice menší koncentraci energie, ale mnohonásobně vyšší energetickou účinnost a celkově nižší provozní náklady.

2.8 Výhody a nevýhody [7], [12], [13], [17], [19], [21]

Velkou předností svařování plazmou je, že umožňuje svařovat i bez přídavných materiálů. Tím pádem spojuje výhody plamenového a obloukového svařování, vysoký svařovací výkon a nízké promísení. Svary jsou hladké, rovnoměrné a pravidelné, a proto se snižuje spotřeba přídavného materiálu a náklady na následné opracování.

Výhody (plazma):

- + stabilní svařovací proces,
- + vyšší rychlost svařování – podle materiálu a parametrů svařování se pohybuje mezi 15 až 85 cm.min⁻¹,
- + minimální tepelně ovlivněná oblast – úzká souvislost s menšími deformacemi,
- + vynikající kvalita svaru – velmi dobrý průvar i tvar svaru, bez bublin a pórů,
- + bez podkládání kořene – díky kvalitnímu formování kořene, se nemusí při vodorovné poloze podkládat až do tloušťky 10 mm,
- + malé převýšení svaru,
- + u základního materiálu jsou zachovány velmi příznivé mechanické hodnoty,
- + hezký vzhled svaru při snadné opakovatelnosti,
- + jednoduchá úprava svarových ploch – do střední tloušťky (cca 8 mm) se svarové plochy před svařováním nemusí úkosovat,
- + možnost svařování jedním průchodem a jenom z jedné strany,
- + lze svařovat střídavým i impulsním proudem,
- + možnost mechanizace svařovacího procesu,
- + úspora přídavného materiálu,
- + vysoká produktivita práce.

Nevýhody (plazma):

- přílišná penetrace – při příliš velkém svařovacím proudu vzhledem ke svařovací rychlosti a tloušťce materiálu, může dojít k průniku svarové lázně,
- složitá optimalizace průtoku plynů u svařování klíčovou dírkou, aby nedošlo k vyfukování taveniny.

Výhody (mikroplazma):

- + stabilita oblouku – i při nejnižších hodnotách proudu (0,05 A) je stále stabilní,
- + bez možnosti znečištění tavné lázně wolframem,
- + vhodné na strojní i ruční svařování,
- + kovový lesk – když se ochranný plyn použije z obou stran spoje, má svar kovový lesk, což je dobré při výrobě lékařských nástrojů.

Nevýhody (mikroplazma):

- šířka svarové mezery – musí být 10 až 20 % tloušťky fólie, to může být někdy problém,
- široká tepelně ovlivněná oblast,
- nákladná příprava před svařovací operací,
- deformace plechů a fólií vlivem tepla vznikajícího při svařování (zejména austenitické oceli),
- pro fólie tenčí než 1,2 mm nutnost instalace upínacího zařízení.

2.9 Oblasti použití [3], [6], [7], [12], [17], [19]

V praxi se plazmové sváření využívá hlavně při spojování plechů malých a středních tloušťek, kde je možné použít jednovrstvé spoje. Nejlepších výsledků se dosahuje při svařování titanu a ušlechtilých ocelí, zejména chromniklových korozivzdorných ocelí, kterým bude věnována celá samostatná kapitola 3, ale svařování plazmou se dá aplikovat i u svařování mědi, hliníku a jejich slitin nebo u běžných uhlíkových ocelí. Materiály o tloušťce 0,01 až 2,0 mm se výhradně svařují mikroplazmou. Tenké plechy nacházejí čím dál větší uplatnění v leteckém a dalších průmyslových oblastech (obr. 12):

- ☐ potravinářství (tlakové nádoby),
- ☐ mikroelektronika,
- ☐ přístrojová technika,
- ☐ chemický průmysl (potrubní systémy),
- ☐ automobilový průmysl,
- ☐ stavba lodí,
- ☐ jaderný průmysl,
- ☐ kosmický průmysl.



Obr. 12 Plazmové hořáky (nahore) a svařování tlakové nádoby (dole) [3], [6]

3 KOROZIVZDORNÉ OCELI [1], [8], [10], [11]

Jsou to vysokolegované oceli obsahující více než 10 hm. % celkového množství legur. Dle ČSN patří do třídy 17. Do této kategorie spadají oceli schopné tzv. pasivace, to znamená, že lépe odolávají chemické nebo elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Aby mohl povrch korozivzdorné oceli pasivovat, musí být splněna podmínka pasivace, a to je obsah chromu minimálně 12 hm. % v tuhém roztoku v závislosti na obsahu uhlíku.

U těchto ocelí je také důležitý princip jejich stabilizace. Z toho důvodu se do nich přidává jako legující prvek titan. Pokud by ocel titan neobsahovala, část chromu by se vážala na uhlík a vznikaly by karbidy chromu. Avšak při vzniku těchto karbidů podléhá ocel korozi. Po přidání zmíněného titanu se již uhlík neváže s chromem, ale právě s titanem. Chrom je tak v oceli stále ve stejném obsahu a ke korozi nedochází.

Podle chemického složení a dosažené mikrostruktury se korozivzdorné oceli rozdělují na:

- feritické chromové oceli,
- martenzitické chromové oceli,
- austenitické Cr-Ni nebo Cr-Ni-Mo oceli,
- austeniticko – feritické (duplexní) Cr-Ni nebo Cr-Ni-Mo oceli.

K austenitickým ocelím se řadí ještě úsporné Cr-Mn nebo Cr-Ni-Mn oceli, kde je deficitní austenitotvorný prvek nikl vyměněn z části, nebo úplně za levnější prvek, mangan. Nevýhoda spočívá v nižších korozivzdorných vlastnostech a technologických potížích při svařování, a proto se dnes prakticky nepoužívají.

3.1 Feritické chromové oceli [1], [8], [10], [11]

Tyto oceli obsahují 10,5 až 30 % Cr a maximálně 0,08 % C. Dalšími legujícími prvky jsou molybden (až 4,5 %), nikl (až 1,6 %) a hliník (až 2,1 %), a pro stabilizaci mikrostruktury se ještě mohou přidávat Ti, Nb, Ta a Zr. Z hlediska obsahu feritotvorných a austenitotvorných prvků je u těchto ocelí mikrostruktura feritická, potom se ocel nazývá plně feritická, nebo feritická s podílem martenzitu, poloferitická ocel.

Při svařování je obzvláště nutné posuzovat svařitelnost normálních feritických ocelí, které mají obsah uhlíku zhruba 0,08 hm. % a feritických ocelí obsahujících velmi nízké hm. % intersticiálních prvků, zejména uhlíku a dusíku ($\leq 0,04$ hm. %).

U klasických feritických ocelí je základní materiál, který nepodléhá vlivům svařování, čistě feritický, ale v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) svarového spoje se může vytvořit martenzit. Uhlík, uvolňující se z rozpouštěných karbidů, může vyvolat vznik austenitu. Ten se ale při rychlostech ochlazování mění na martenzit. V důsledku toho se feritické chromové oceli klasického typu svařují s předehřevem, který zpomaluje proces ochlazování ve svaru a v TOO. Teplota předehřevu se určuje experimentálně, zkouškami praskavosti.

V oblasti přehřátí TOO při teplotách 950 °C se dá předpokládat zhrubnutí zrna, a následně zkřehnutí tohoto pásma. To, jak zrna rostou, závisí na nejvyšší dosažené teplotě, době výdrže na nejvyšší teplotě a na počtu svarových housenek při svařování. Čistě feritické oceli se svařují do tloušťky přibližně 2,5 mm a s omezeným tepelným příkonem. U stabilizovaných feritických a poloferitických ocelí není růst zrn tak patrný, a proto se svařují tloušťky nad 3 mm.

Pokud se dosáhne snížení obsahu přidaných prvků C a N ve feritické oceli, tak i v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje vznikne čistě feritická struktura. Takové materiály se svařují většinou bez předehřevu, protože nejsou náchylné na vznik studených trhlin. Z důvodu stabilizace se přidává převážně titan, ocel má pak do obsahu Ti 0,7 hm. % dobrou odolnost i vůči teplým trhlinám. Zde je hlavním problémem při svařování pokles vrubové

houževnatosti v pásmu přehřátí TOO kvůli zhrubnutí zrna, a tak se svařuje pomocí co nejmenšího tepelného příkonu.

Jako ochranné plyny se používají argon a směsi na jeho bázi. Důležitá je dokonalá čistota svarových ploch a obsah $C + N \leq 0,04$ hm. %, aby nedošlo ke vzniku martenzitu.

3.2 Martenzitické chromové oceli [1], [8], [10], [11]

Tyto oceli obsahují 13 až 17 % Cr a až 4 % Ni. Z hlediska chemického složení se dělí na:

- martenzitické oceli,
- precipitačně vytvrzené martenzitické oceli,
- martenziticko – austenitické oceli.

U klasických martenzitických ocelí s obsahem 12 až 13 hm. % Cr se teplota předehřevu pohybuje někde kolem hranice 250 °C. Výhodou je, že při této teplotě předehřevu zůstává dostatečné množství austenitu ve struktuře během svařování. Austenit zlepšuje plastické vlastnosti a absorbuje difuzní vodík, čímž pomáhá ke snížení vnitřního napětí.

Precipitačně vytvrzené martenzitické oceli mají obsah C menší než 0,1 % a k jejich dolegování se používají tyto prvky: Cu, Ti, Nb, Mo a Al. Svařují se v žíhaném, zušlechtěném, popuštěném nebo tvrdém stavu. Jejich hlavní nevýhodou je prokalitelnost a náchylnost ke vzniku studených trhlin, proto se při svařování těchto ocelí využívá předehřevu materiálu a dohřev svarových spojů.

V pásmu přehřátí tepelně ovlivněné oblasti a ve svarovém materiálu je mezní hodnotou požadovaných mechanických vlastností hodnota vrubové houževnatosti. Z toho důvodu se musí svarové spoje martenzitických chromových ocelí tepelně zpracovat. K tomu obvykle dochází popouštěním pod hranici A_{c1} , eutektoidní teplotu cca 720 °C. Popouští se za účelem snížení zbytkových napětí a také popuštění martenzitu, během kterého dochází ke snížení jeho pevnosti a tvrdosti a naopak se zvýší houževnatost a tažnost.

Martenzitické oceli mají velkou vrubovou citlivost, a tak je nutné se při svařování vyhnout ostrým přechodům, neprůvarům nebo studeným spojům. Dále jsou tyto materiály citlivé na žíhací praskavost, ke které dochází vlivem rychlého ohřevu na žíhací teplotu. Rychlý ohřev má za následek také velký teplotní gradient mezi povrchem materiálu a středem jeho tloušťky, který je příčinou vzniku dalších napětí. Rychlost ohřevu se doporučuje na 30 až 80 °C/h v závislosti na tuhosti a tvaru konstrukce.

Přídavný materiál je u těchto ocelí stejný, z hlediska chemického složení, jako základní materiál a s velmi nízkým obsahem difuzního vodíku. Mohou se použít i austenitické přídavné prvky, ale to jen a podmínky, že bude splněna mez pevnosti svarového spoje. U velmi tuhých materiálů se používají slitiny Ni-Cr nebo Ni-Cr-Fe, které mají výborné plastické vlastnosti. Pro svařování se mohou použít běžné technologie, ale vhodné je i svařování plazmou. Tepelný příkon se pohybuje v rozmezí 0,5 až 1,5 kJ.mm⁻¹.

Lité oceli na výrobu čerpadel a vodních turbín tvoří speciální skupinu martenzitických chromových ocelí, martenziticko – austenitické oceli, které jsou legovány přibližně 13 hm. % Cr, 4 až 6 hm. % Ni, 0,4 až 1,0 hm. % Mo a 0,06 hm. % C. Austenit může být zastoupen 5 až 25 % v martenzitické matici a jeho úlohou je rozpouštět difundující vodík ze svarového kovu, čímž zabraňuje vzniku studených trhlin a navíc má pozitivní vliv na vrubovou houževnatost. Tyto oceli mají lepší svařitelnost oproti klasickým martenzitickým chromovým ocelím a zároveň lépe odolávají korozi a kavitaci. Zlepšená svařitelnost a zvýšená vrubová houževnatost je patrná z jejich mikrostruktury. Tloušťky do 8 mm se svařují bez předehřevu a větší tloušťky s předehřevem 100 až 200 °C.

3.3 Austenitické Cr-Ni (Cr-Ni-Mo) oceli [1], [8], [10], [11]

Austenitické oceli většinou obsahují minimálně 16,5 hm. % Cr a Ni, kterého musí být dostatek, aby bylo možné vytvořit austenitickou mikrostrukturu. Nikl může být nahrazen prvky Mn, C a N. K potřebnému dolegování se používají Mo, Cu, Nb, Ti a Si. Hlavním důvodem je lepší odolnost vůči korozi a také oxidaci. Ve srovnání s feritickými oceli mají asi o polovinu větší tepelnou roztažnost a zhruba o 30 % nižší tepelnou vodivost, což má za následek vznik větších deformací a napětí při následném svařování. Výhodami jsou lepší houževnatost a tažnost vzhledem k austenitické struktuře.

Tyto oceli jsou náchylné k teplým krystalizačním trhlinám, které vznikají pouze ve svařovém materiálu. Příčinou jejich vzniku jsou prvky S, P, Nb, Ti, Si, které snižují buď tvárnost kovu při svařování, nebo technologickou pevnost hranic zrn. Hlavním faktorem, jak zmenšit náchylnost austenitických ocelí na vznik teplých trhlin, je množství δ -feritu ve struktuře. Obsah feritu delta se vyjadřuje feritovým číslem (FN) a při pokojové teplotě se ho vyžaduje ve svařových kovech mezi 3 FN až 15 FN. Větší množství by znamenalo menší korozivzdornost a podporu vzniku σ -fáze.

Fáze σ je křehká a tvrdá intermetalická sloučenina, kvůli které křehnou austenitické oceli. Tato fáze může vzniknout ve svařované oblasti při teplotách 500 až 820 °C. Do horní hranice tohoto rozmezí (820 °C) je fáze stabilní, jakmile se teplota zvýší, delta fáze se přemění na α -fázi.

U austenitických ocelí se aplikuje přídavný materiál se stejným nebo podobným chemickým složením jako má materiál základní. Velmi důležité je dodržet požadovaný obsah δ -feritu ve svařovém kovu. Tyto oceli jsou vhodné pro svařování téměř všemi technologiemi, včetně plazmového svařování. Samotný proces svařování probíhá bez předehřevu, protože nedochází k zakalení a oceli nejsou náchylné na vznik studených trhlin. Předehřev by rovněž měl negativní účinky na korozní odolnost svaru. Z důvodu, již zmíněné, náchylnosti k teplým trhlinám, je tepelný příkon do svaru maximálně 1,5 kJ.mm⁻¹. Navíc snížený tepelný příkon minimalizuje nebezpečí růstu zrn v pásmu přehřátí tepelně ovlivněné oblasti. K tepelnému zpracování u těchto ocelí téměř nedochází, a pokud ano, využívá se žíhání na snížení vnitřních napětí nebo rozpouštěcí žíhání ke zlepšení korozivzdornosti. Ve většině případů se jako ochranný plyn používá čistý argon nebo směs argon-vodík a argon-helium.

3.4 Austeniticko – feritické oceli [1], [8], [10], [11]

Jinak nazývané také jako duplexní oceli, jejichž mikrostruktura obsahuje 45 až 60 % austenitu ve feritické matici. Chemické složení je 21 až 28 % Cr, 3,5 až 8 % Ni, 0,1 až 4,5 % Mo a 0,05 až 0,35 % N. Mezi další legury může patřit měď nebo wolfram. Jejich mez pevnosti je vyšší ve srovnání s čistě feritickými nebo austenitickými oceli. Jsou mírně magnetické a nedají se zpevnit tepelným zpracováním. Používají se při teplotách do 300 °C, protože při vyšších teplotách by docházelo ke zkřehnutí. V rámci tuhnutí jsou duplexní oceli stejné jako oceli feritické, což znamená, že nejsou prakticky náchylné na vznik teplých trhlin a mají velice dobré korozivzdorné vlastnosti. Dále se dělí na:

- > nízkolegované,
- > středně legované,
- > vysoce legované.

Nízkolegované obsahují nízké procento prvku Mo a využívají se hlavně jako náhrada klasických austenitických ocelí tam, kde se požaduje větší odolnost vůči koroznímu praskání. U střednělegovaných ocelí už je obsah Mo vyšší a používají se předně v chemickém průmyslu

nebo při stavbě těžebních plošin v moři. Zvýšený obsah Mo, Cr a W mají oceli vysokolegované, které svoje uplatnění naleznou hlavně v silně korozních prostředích.

Zvýšený obsah feritu ve svaru a v TOO má negativní vliv na vrubovou houževnatost, a proto je u nízko a středně legovaných ocelí hodnota tepelného příkonu maximálně $2,5 \text{ kJ.mm}^{-1}$. Duplexní oceli se ve většině případů svařují bez přehřevu nebo s teplotou přehřevu max. $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Z toho důvodu musí být stanovena i minimální hodnota tepelného příkonu, ta činí $0,5 \text{ kJ.mm}^{-1}$. U vysokolegovaných duplexních ocelí se tepelný příkon pohybuje v rozmezí $0,2$ až $1,5 \text{ kJ.mm}^{-1}$.

Používají se zde přídavné materiály stejného chemického složení, jako má základní materiál, pouze s rozdílem vyššího obsahu niklu. Větší množství Ni snižuje obsah feritu ve svaru. V této oblasti vznikají svarové housenky, které vyvolávají napětí. Z tohoto důvodu je největší tvrdost v oblasti kořene u jednostranných svarových spojů velkých tloušťek. Vrubová houževnatost výsledného svaru je oproti základnímu materiálu menší a je ovlivněna jak metodou svařování, tak svařovacími parametry.

U duplexních ocelí se svarové spoje většinou tepelně nezpracovávají, a pokud ano, dochází k rozpouštěcímu žíhání s následným rychlým ochlazením. Svařují se všemi základními obloukovými technologiemi svařování, při dodržení požadavků na velikost tepelného příkonu. Při použití jiných technologií, bez přídavného materiálu, které jsou charakteristické vysokou rychlostí ochlazování, například elektronový paprsek, laser nebo plazma, bude ve svaru a tepelně ovlivněné oblasti vyšší obsah feritu, než v základním materiálu. Ve výsledku může dojít ke snížení korozní odolnosti, menší tažnosti a vrubové houževnatosti. To napraví rozpouštěcí žíhání svarového spoje po svaření.

Pro plazmové svařování se jako ochranný plyn používá především argon, Ar-He nebo Ar-N₂, kde N₂ je zastoupeno do 3 %. Dusík, jako austenitotvorný prvek, snižuje obsah feritu ve svaru.

4 EXPERIMENT [15]

Při experimentálním řešení bylo za úkol porovnání dvou návarů provedených různými parametry. Ze svařovacích parametrů se vypočítalo specifické vnesené teplo. Dalším úkolem bylo vyhodnocení metalografické makrostruktury, ze které se počítalo zředění svarového kovu a následně zjištění tvrdosti materiálu ve třech oblastech vzorku. První oblastí byl základní materiál, druhou tepelně ovlivněná oblast svaru a poslední svarový kov.

Základním materiálem byla žárupevná ocel, která měla chemické složení nacházející se v tabulce 3 a mechanické vlastnosti uváděné v tabulce 4.

Tab. 3 Chemické složení základního materiálu.

C [%]	Mn [%]	S [%]	Mo [%]	V [%]	Si [%]	P [%]
0,27 – 0,31	0,3 – 0,8	max. 0,007	1,0 – 1,2	0,25 – 0,35	max. 0,1	max. 0,007
Cr [%]	Ni [%]	Al [%]	As [%]	Sb [%]	Sn [%]	Cu [%]
1,1 – 1,4	0,50 – 0,75	max. 0,01	max. 0,02	max. 0,0015	max. 0,01	max. 0,12

Tab. 4 Mechanické vlastnosti základního materiálu při 20 °C.

R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z ₁ [%]
min. 550	700 – 850	40	20

Na této oceli se udělal z každé strany jeden svar při svařovacích parametrech, které se nachází v tabulce 5. Svary byly provedeny svařovacím zařízením EuTronic GAP 3001 DC, viz obr. 13. Výrobce tohoto zařízení je švýcarská firma Castolin Eutectic a je vhodné pro následující metody: svařování plazmovým paprskem keyhole, navařování plazmou práškem, svařování plazmovým paprskem studeným drátem, svařování TIG a svařování TIG studeným drátem. Z hlediska parametrů zařízení: napájení činí 3x400 V, napájecí frekvence má hodnoty 50 – 60 Hz, intenzita pilotního proudu se pohybuje mezi 0,5 – 10 A, intenzita svařovacího proudu je od 0,3 – 160 A a napětí na prázdko je 110 V.



Obr. 13 EuTronic GAP 3001 DC

Tab. 5 Svařovací parametry.

Svar	I [A]	U [V]	Posuv v _s [cm.min ⁻¹]	Průměr trysky [mm]	Plazmový plyn [l.min ⁻¹]	Ochranný plyn [l.min ⁻¹]	Předehřev [°C]
1	47	16,4	9	1,2	1,6	15	130
2	47	16,4	7	1,2	1,6	15	130

Svařovací parametry byly, kromě jedné hodnoty, u obou návarů stejné. Lišily se pouze v rychlosti svařovacího posuvu. Jako plazmový i ochranný plyn byl zvolen samostatný argon. Specifické vnesené teplo se vypočítá ze vztahu:

$$Q_s = \mu \cdot \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s}, \quad (1.3)$$

kde: Q_s – specifické vnesené teplo [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$]

μ – koeficient účinnosti [-]

U – svařovací napětí [V]

I – svařovací proud [A]

v_s – svařovací rychlost [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

Specifické vnesené teplo se počítalo pro oba návary ze vztahu (1.3):

- svar 1:

$$Q_s = \mu \cdot \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} = 0,7 \cdot \frac{16,4 \cdot 47}{10^3 \cdot 1,5} = 0,359 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

kde: $\mu = 0,7$

$U = 16,4 \text{ V}$

$I = 47 \text{ A}$

$v_s = 9 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1} = 1,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Specifické vnesené teplo pro svar 1 má hodnotu $Q_s = 0,359 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$

- svar 2:

$$Q_s = \mu \cdot \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} = 0,7 \cdot \frac{16,4 \cdot 47}{10^3 \cdot 1,17} = 0,461 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

kde: $\mu = 0,7$

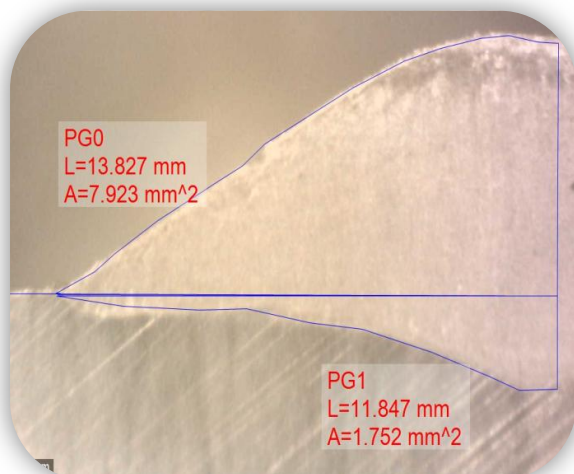
$U = 16,4 \text{ V}$

$I = 47 \text{ A}$

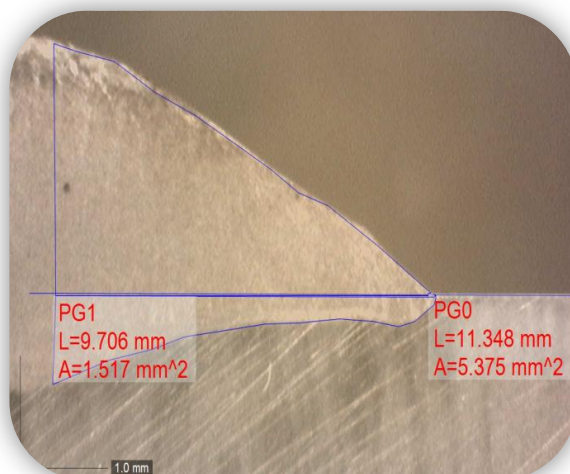
$v_s = 7 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1} = 1,17 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Specifické vnesené teplo pro svar 2 má hodnotu $Q_s = 0,461 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$

Po vyhotovení obou svarů byl proveden metalografický výbrus. Tento proces obsahoval nejprve řez kolmý na svarovou housenku, který se následně brousil, poté leštil a nakonec leptal leptadlem Nital 2%, z důvodu vyvolání makrostruktury. Po vyvolání makrostruktury byl vzorek vložen pod mikroskop a fotograficky zdokumentován (obr. 14), (obr. 15). Vzorek se musel vyfotografovat na dvě poloviny, protože se celý nevešel do záběru.



Obr. 14 Makrostruktura svaru 1



Obr. 15 Makrostruktura svaru 1

Po přenesení fotek do počítače se změřil obsah návaru a závaru každé poloviny svaru. Obsahy byly potřeba pro výpočet zředění svarového kovu:

$$Z = \frac{S_Z}{S_Z + S_N} \cdot 100, \quad (1.4)$$

kde: Z – zředění [%]

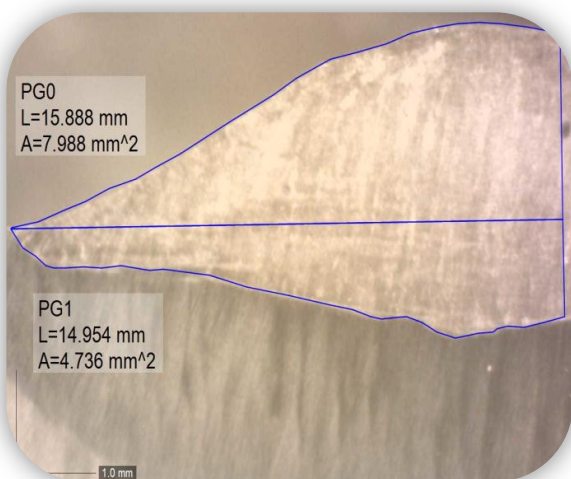
S_Z – obsah závaru [mm^2]

S_N – obsah návaru [mm^2]

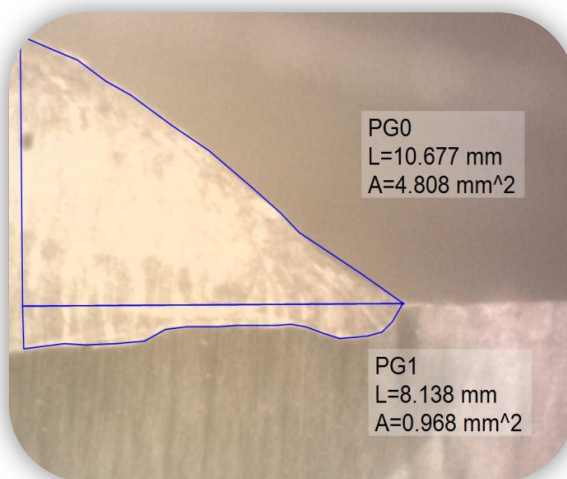
Na obr. 14 a obr. 15 jsou vidět hodnoty jednotlivých obsahů. Ty se musely sečíst, a poté dosadit do vztahu (1.4):

$$Z = \frac{S_Z}{S_Z + S_N} \cdot 100 = \frac{1,752 + 1,517}{(1,752 + 1,517) + (7,923 + 5,375)} \cdot 100 = \frac{3,269}{3,269 + 13,298} \cdot 100 = 19,73\%$$

Zředění svarového kovu u svaru 1 tedy vyšlo 19,73%. Stejný postup jako u prvního svaru, následoval pro svar 2. Fotky makrostruktury byly zdokumentovány opět na dvě poloviny (obr. 16), (obr. 17).



Obr. 16 Makrostruktura svaru 2



Obr. 17 Makrostruktura svaru 2

Na obr. 16 a obr. 17 jsou vidět hodnoty jednotlivých obsahů. Ty se opět musely sečíst, a poté dosadit do vztahu (1.4):

$$Z = \frac{S_Z}{S_Z + S_N} \cdot 100 = \frac{4,736 + 0,968}{(4,736 + 0,968) + (7,988 + 4,808)} \cdot 100 = \frac{5,704}{5,704 + 12,796} \cdot 100 = 30,83\%$$

Zředění svarového kovu pro svar 2 vyšlo 30,83%. Po vypočítání zředění svarového kovu pro oba svary bylo dalším úkolem experimentu zjištění tvrdosti materiálu v jednotlivých oblastech.

Tvrdost byla měřena metodou podle Vickerse na tvrdoměru značky Zwick. Zkouška podle Vickerse se řadí mezi zkoušky vnikací. Indentorem je zde čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° , který je vtlačován do zkoumaného materiálu, vtisky tedy mají pravidelné čtyřhranné tvary. Daný úhel je zvolen z důvodu, aby byl výsledek co nejméně ovlivněn třením. Zatěžující síla se pohybuje mezi 10 – 490 N a doba zatížení je 10 – 15 sekund. Zátěžnou sílu ovlivňuje hmotnost závaží, které je umístěno na tvrdoměru a vybírá se podle vlastností vzorku. Hloubka vtisku nesmí přesáhnout 1/10 povrchové vrstvy, a proto bylo zvoleno závaží o hmotnosti 10 kg, které vyprodukuje zátěžnou sílu 98,1 N. Pro takovou zátěžnou sílu je označení HV10. Doba zatížení byla v tomto případě 15 sekund a počítá se od momentu, kdy hrot dosedne na povrch vzorku. Po vyhotovení vtisku se pomocí mikroskopu změří úhlopříčky a jejich průměrná hodnota se dosadí do vztahu pro výpočet tvrdosti materiálu:

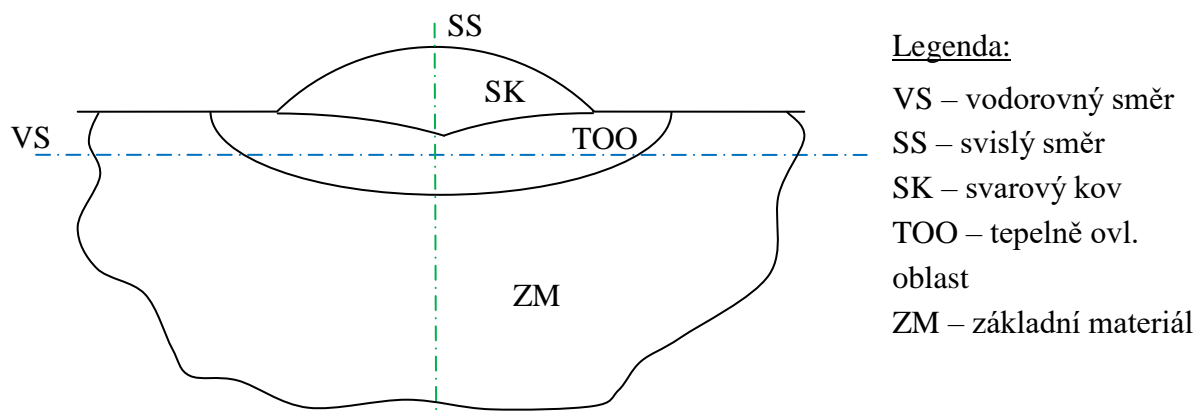
$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2}, \quad (1.5)$$

kde: HV – tvrdost podle Vickerse [-]

F - zátěžná síla [N]

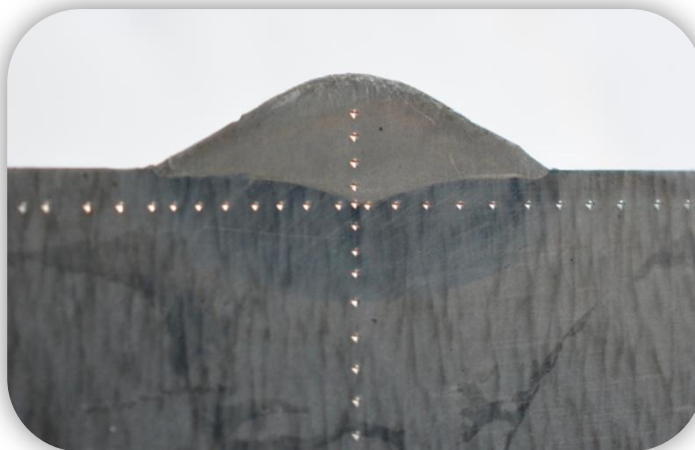
u – průměrná hodnota úhlopříčky vtisku [mm]

Pro každý z obou svarů byla měřena tvrdost nejprve ve vodorovném směru, zleva doprava, a poté ve svislém směru, shora dolů (obr. 18). Nejprve byl svar 1. Při měření ve vodorovném



Obr. 18 Schéma řezu procházejícího swarem

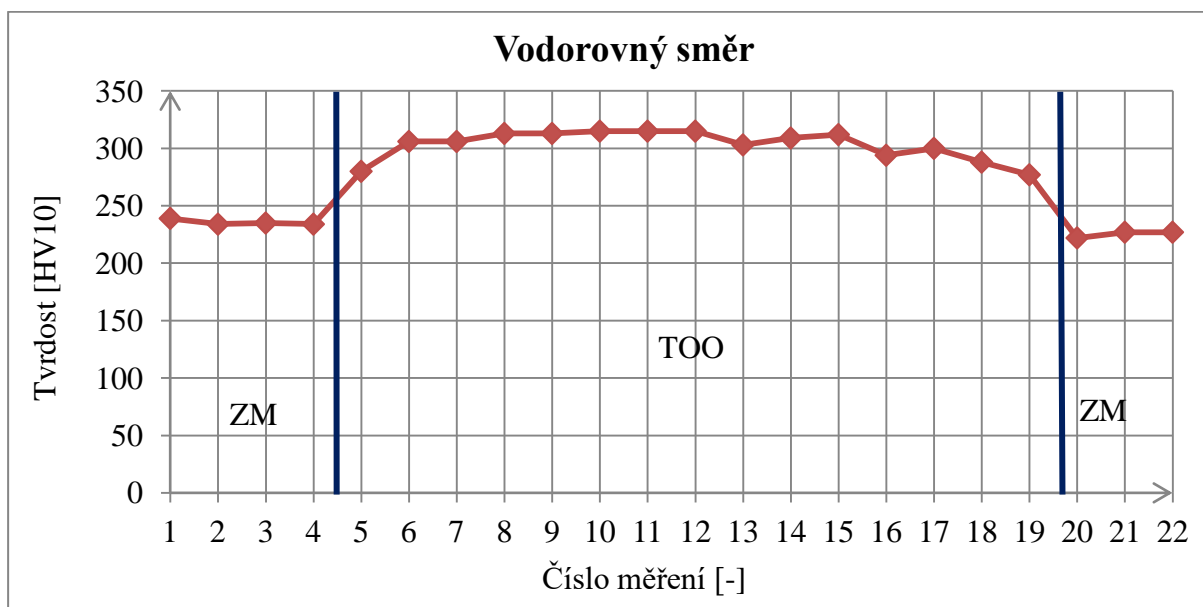
směru se dělaly vtisky po milimetru (obr. 19), takže hodnoty pro čísla měření v tabulce 6 odpovídají vzdálenosti od počátku měření. V tomto, vodorovném, směru se začaly hodnoty tvrdosti měřit na základním materiálu, poté se přešlo do tepelně ovlivněné oblasti a nakonec zase zpátky na základní materiál, viz obr. 20. V tomto grafu je krásně vidět přechod ze základního materiálu do tepelně ovlivněné oblasti, kdy hodnoty tvrdosti narůstají a poté zase návrat zpět do základního materiálu, kdy hodnoty tvrdosti rychle klesají.



Obr. 19 Vtisky při měření tvrdosti, svar 1

Tab. 6 Hodnoty tvrdosti pro vodorovný směr u svaru 1.

Č. m.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
HV10	239	234	235	234	280	306	306	313	313	315	315
Č. m.	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
HV10	315	303	309	312	294	300	288	277	222	227	227



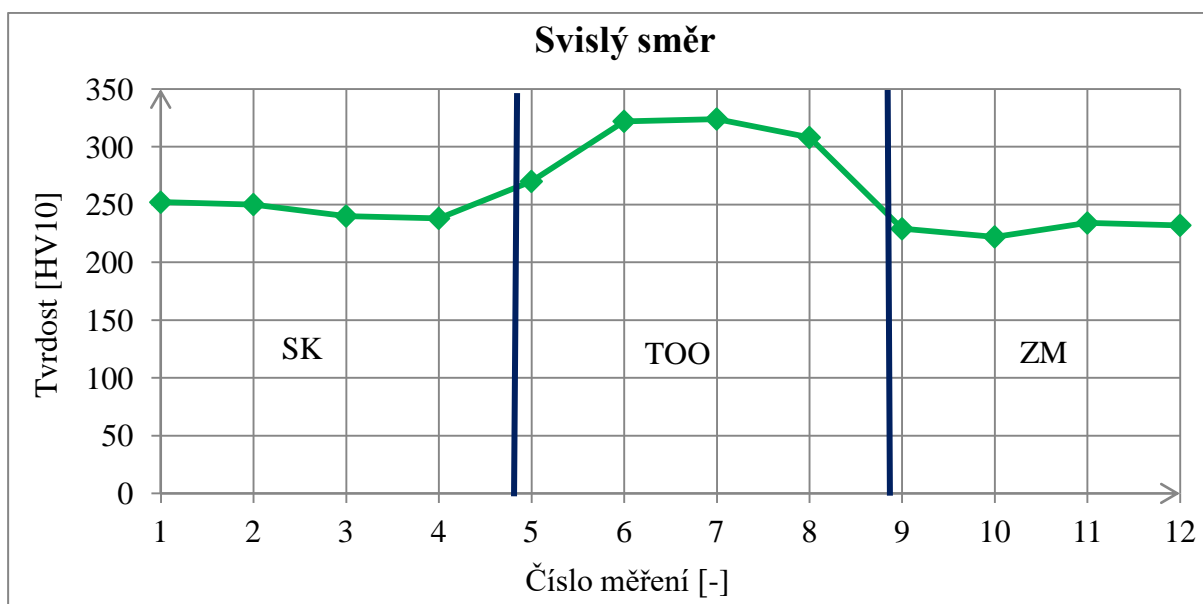
Obr. 20 Graf hodnot tvrdosti vodorovného směru pro svar 1

Stejné měření, jako pro vodorovný směr, se dělalo i pro směr svislý. Opět se měřilo po milimetru, takže čísla měření v tabulce 7 odpovídají vzdálenosti od počátku měření. Ve svislém směru se začala tvrdost měřit na svarovém kovu (obr. 19), poté se přešlo do tepelně ovlivněné oblasti, a nakonec se hodnoty braly ze základního materiálu, viz obr. 21.

Tab. 7 Hodnoty tvrdosti pro svislý směr u svaru 1.

Č. m.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
HV10	252	250	240	238	270	322	324	308	229	222	234	232

V grafu je opět vyznačený přechod mezi jednotlivými oblastmi, kdy nárůst mezi svarovým kovem a tepelně ovlivněnou oblastí je pozvolnější a pokles mezi tepelně ovlivněnou oblastí a základním materiálem strmější.



Obr. 21 Graf hodnot tvrdosti svislého směru pro svar 1

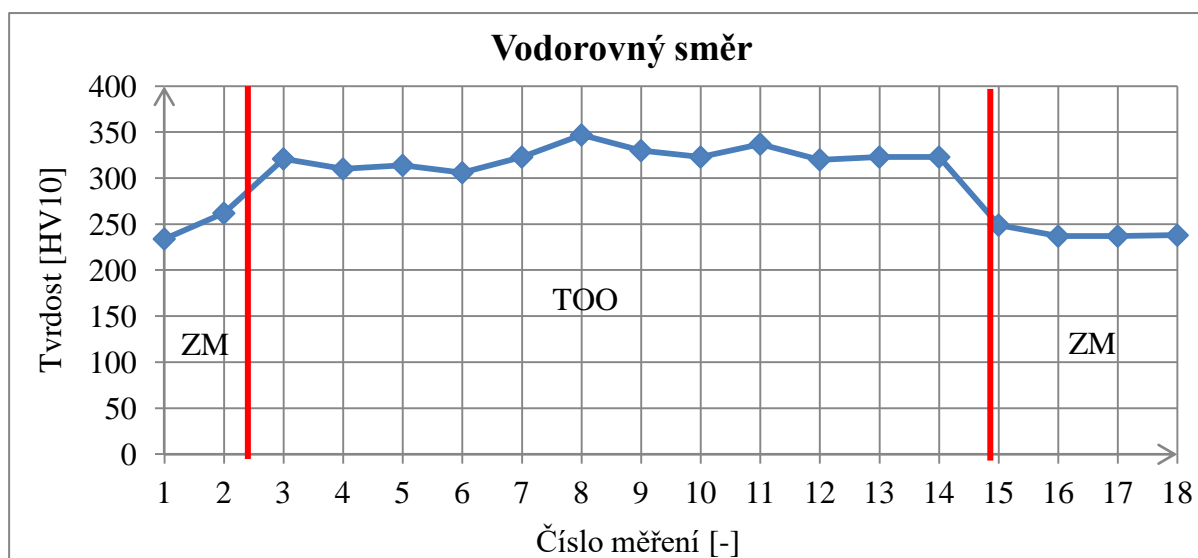
Po dokončení měření tvrdosti na prvním svaru se přešlo na svar 2. Měření (obr. 22) probíhalo úplně stejně, tedy nejprve získání hodnot tvrdosti ve vodorovném směru, po milimetrových intervalech, jak je napsáno v tabulce 8. Začátek byl opět na základním materiálu a hodnoty začaly okamžitě narůstat, viz obr. 23. Po přechodu do tepelně ovlivněné oblasti se hodnoty poměrně ustálily. Rychlý pokles nastal až po návratu zpět do základního materiálu.



Obr. 22 Vtisky při měření tvrdosti, svar 2

Tab. 8 Hodnoty tvrdosti pro vodorovný směr u svaru 2.

Č. m.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
HV10	234	262	321	310	314	306	323	347	330	323	337
Č. m.	12	13	14	15	16	17	18				
HV10	320	323	323	249	237	237	238				



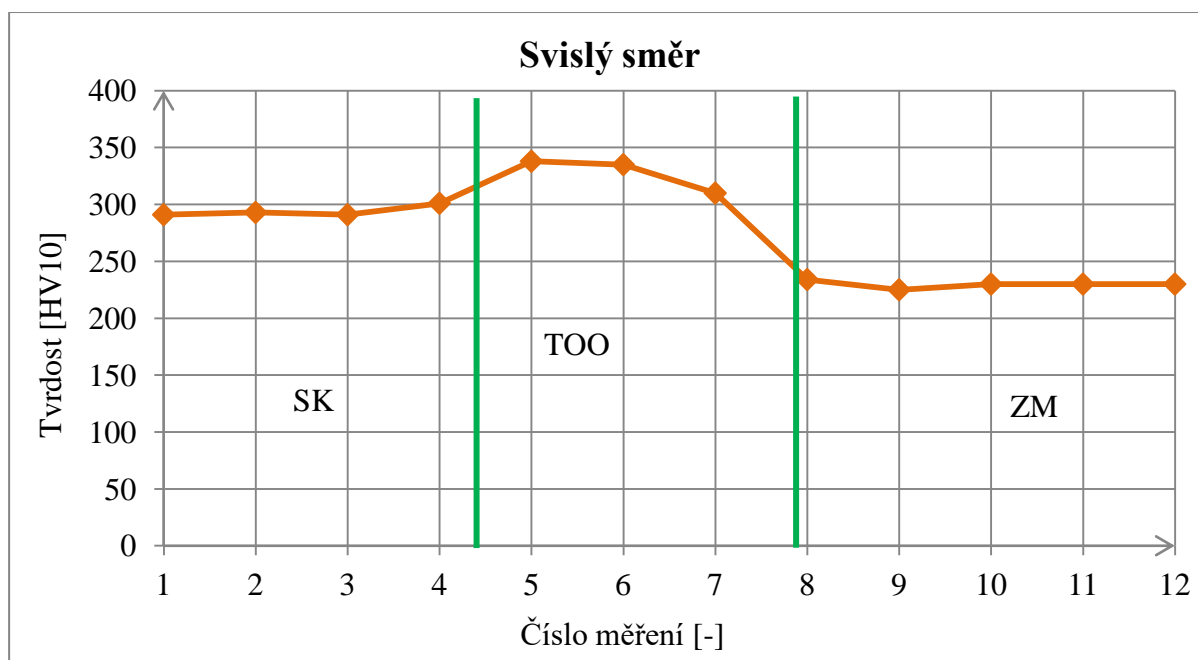
Obr. 23 Graf hodnot tvrdosti vodorovného směru pro svar 2

Po vodorovném směru následoval směr svislý, shora dolů (obr. 22). Vzdálenost mezi měřeními zůstala stejná, jeden milimetr, viz tabulka 9.

Tab. 9 Hodnoty tvrdosti pro svislý směr u svaru 2.

Č. m.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
HV10	291	293	291	301	338	335	310	234	225	230	230	230

Měření tvrdosti začalo na svarovém kovu, poté nastal malý nárůst hodnot, když se přešlo do tepelně ovlivněné oblasti. Rapidní pokles nastal mezi tepelně ovlivněnou oblastí a základním materiálem (obr. 24).



Obr. 24 Graf hodnot tvrdosti svislého směru pro svar 2

5 ZÁVĚRY

První část bakalářské práce byla zaměřena na podrobný popis svařování plazmou, které patří do skupiny moderního tavného svařování. Při jeho průběhu dosahuje teplota svařovacího paprsku až 30 000 °C. Největším rozdílem mezi plazmou a mikroplazmou je svařovací proud. Zatímco u mikroplazmy dosahují hodnoty proudu od 0,05 do 20 A, u plazmy se pohybují od 20 do 100 A. Při svařování keyhole musí být proud i vyšší než 100 A. Rozdíl je i v tloušťkách svařovaných materiálů. U mikroplazmy to bývají plechy nebo fólie od 0,01 až po 2 mm, plazma se začíná používat při tloušťkách 2 mm a vyšších.

Ve druhé, experimentální části, bylo cílem porovnat dva svař provedené na žárupevné oceli. Bohužel nebyla k dispozici mikroplazma, a tak byly oba vzorky navařeny plazmou. Jako plazmový plyn byl použit argon, stejný prvek zastal i funkci ochranného plynu. Svařovací parametry byly u obou svařů totožné, lišily se pouze svařovací rychlosti, kdy v prvním případě byl posuv $v_s = 9 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ a v druhém případě $v_s = 7 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$. Pro výpočet specifického vneseného tepla se tyto jednotky musely převést na základní, tj. $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Specifické vnesené teplo u prvního svař vyšlo $Q_s = 0,359 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$, pro svař 2 mělo hodnotu $Q_s = 0,461 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$.

Pro zjištění makrostruktury se musel provést metalografický výbrus. Ten obsahoval nejprve řez kolmý na svarovou housenku, který se následně brousil, poté leštil a nakonec leptal leptadlem Nital 2%. Když byla makrostruktura provedena, mohly se vzorky fotograficky zdokumentovat pod mikroskopem. Z těchto fotek se počítaly obsahy návarů a závarů obou svařů. Návar na svaru 1 měl hodnotu $S_N = 13,298 \text{ mm}^2$ a závar $S_Z = 3,269 \text{ mm}^2$. U svaru 2 byl návar $S_N = 12,796 \text{ mm}^2$ a závar $S_Z = 5,704 \text{ mm}^2$. Tyto hodnoty bylo potřeba zjistit z důvodu výpočtu zředění svarového kovu. Zředění svarového kovu na svaru 1 vyšlo $Z = 19,73 \%$ a u svaru 2 činilo $Z = 30,83 \%$. U svaru 2 je zředění svarového kovu o třetinu větší, což je to dáno větší plochou závaru a naopak menší plochou návaru.

Tvrдость obou vzorků se měřila metodou podle Vickerse. Pro dostatečné zatížení bylo zvoleno závaží o hmotnosti 10 kg, které vyprodukuje zátěžnou sílu $F = 98,1 \text{ N}$, ta odpovídá označení HV10. Doba zatížení při jednotlivých vtiscích činila 15 sekund. U obou vzorků nejprve proběhlo měření tvrdosti ve vodorovném směru zleva doprava a poté ve svislém směru shora dolů. Při vodorovném měření se ze základního materiálu přešlo do tepelně ovlivněné oblasti a poté zase zpět do základního materiálu. A při svislém měření se začalo svarovým kovem a přes tepelně ovlivněnou oblast se přešlo do základního materiálu. Z jednotlivých měření byly vytvořeny grafy a v nich je dobře znázorněno, že nejmenších hodnot tvrdosti dosahuje základní materiál, o něco větší hodnoty má svarový kov a největší tvrdostí disponuje tepelně ovlivněná oblast. Největší hodnota byla naměřena u svaru 2 ve vodorovném směru, a to 347 HV.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [5]

1. KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-857-7185-3.
2. ASM HANDBOOK. *Welding, Brazing and Soldering*. Vol. 6. USA: ASM, 2003, 1298 s. ISBN 0-87170-382-3.
3. ATRA. *Plasma treatment* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://atra.it/services/plasma/>
4. CEBORA. *Strojní plazmové hořáky* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.hstcebor.cz/katalog/prislusenstvi/plazmove-horaky/cp-251-g/schema-horaku-s137cz>
5. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2017 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
6. FRONIUS INTERNATIONAL. *Plasma-keyhole* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-02F92B11FC0FD2AC/fronius_international/hs.xsl/79_13513_ENG_HTML.htm#.WOOihtLyhPZ
7. HLAVATÝ, Ivo. *Teorie a technologie svařování* [online]. Ostrava: Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011, 262 s. ISBN 978-80-248-2414-7. Dostupné také z: <http://fs1.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>
8. HRIVŇÁK, Ivan. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. Bratislava: Veda, 1989, 343 s. ISBN 80-224-0016-5.
9. Hypertherm. *Plasma technology* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/learn/cutting-education/plasma-technology/>
10. KONSTRUKCE Media, s.r.o. *Korozivzdorné materiály – základní typy ocelí a doporučení pro jejich svařitelnost* [online]. 2014 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/korozivzdorne-materialy-zakladni-typy-oceli-a-doporuceni-pro-jejich-svaritelnost/>
11. KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009, 240 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
12. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II: Část svařování* [online]. Brno, 2006 [cit. 2017-03-20]. 68 s. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory.htm>
13. MRŇA, Libor. *Speciální metody svařování: Dělení a svařování plazmou* [online]. 2013 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__deleni_a_svarovani_plasmou_2013__mrna.pdf
14. REIS. *Svařování* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://reisrobotics.cz/cz/produkty/opracovn-kov/svaovn>
15. SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-417-1.

16. SVÁŘECKY-ELEKTRODY.CZ. *Pracovní polohy při svařování* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.svarecky-elektrody.cz/pracovni-polohy-pri-svarovani/t-375/>
17. SVĚT SVARU. *Svařování plazmovým obloukem* [online]. 2014 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: http://www.svetsvaru.cz/wp-content/uploads/2014/05/2014-1_Svarovani-Plasmou.pdf
18. TECHMAGAZÍN. *Svařování a robotizace – od pravěkých kovářů k průmyslové hi-tech* [online]. 2012 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/437>
19. TURŇA, Milan. *Špeciálne metódy zvarania*. Bratislava: ALFA, 1989, 384 s. ISBN 80-05-00097-9.
20. ULBRICH. *O technologii plasmatu* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.ulbrich.cz/o-technologie-plasmatu>
21. ŽÁK, Jan a Miroslav NOVÁK. *Teorie svařování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1988, 142 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A_{c1}	Překrystalizační teplota	[°C]
A	Tažnost	[%]
e	Elementární náboj	[C]
F	Zátěžná síla	[N]
HV	Tvrdost podle Vickerse	[-]
I	Svařovací proud	[A]
k	Boltzmannova konstanta	[J.K ⁻¹]
L	Lineární rozměr plazmatu	[m]
n_0	Koncentrace nabitých částic	[m ⁻³]
n_i	Koncentrace ionizovaných atomů	[m ⁻³]
n_n	Neutrální atom	[m ⁻³]
Q_s	Specifické vnesené teplo	[kJ.mm ⁻¹]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	Nevýrazná mez kluzu v tahu	[MPa]
S_N	Obsah návaru	[mm ²]
S_Z	Obsah závaru	[mm ²]
T	Teplota plazmatu	[K]
T_e	Teplota elektronu	[K]
U	Svařovací napětí	[V]
U_i	Ionizační energie plynu	[eV]
u	Průměrná hodnota úhlopříčky vtisku	[mm]
v_s	Svařovací rychlost	[mm.s ⁻¹]
Z	Zředění svarového kovu	[%]
Z_1	Kontrakce	[%]
ϵ_0	Permitivita vakua	[F.m ⁻¹]
λ_D	Debyeova stínící délka	[m]
μ	Koeficient účinnosti	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Svařování plazmou [14], [18], [20].....	9
Obr. 2 Změna stavu skupenství při závislosti teploty na zvyšování energie [19].....	10
Obr. 3 Ionizace plynu [13]	10
Obr. 4 Disociace molekul [13]	11
Obr. 5 Plazma a metoda TIG [17]	12
Obr. 6 Schéma plazmového hořáku [12].....	12
Obr. 7 Konstrukce plazmového hořáku [4].....	14
Obr. 8 Svařování klíčovou dírkou [2]	15
Obr. 9 Druhy přípravy svarových ploch [17], [19]	16
Obr. 10 Příprava svarových spojů [17], [19].....	16
Obr. 11 Svařovací polohy [16]	17
Obr. 12 Plazmové hořáky a svařování tlakové nádoby [3], [6].....	19
Obr. 13 EuTronic GAP 3001 DC	24
Obr. 14 Makrostruktura svaru 1	25
Obr. 15 Makrostruktura svaru 1	25
Obr. 16 Makrostruktura svaru 2	26
Obr. 17 Makrostruktura svaru 2	26
Obr. 18 Schéma řezu procházejícího svarem	27
Obr. 19 Vtisky při měření tvrdosti, svar 1	27
Obr. 20 Graf hodnot tvrdosti vodorovného směru pro svar 1	28
Obr. 21 Graf hodnot tvrdosti svislého směru pro svar 1	28
Obr. 22 Vtisky při měření tvrdosti, svar 2.....	29
Obr. 23 Graf hodnot tvrdosti vodorovného směru pro svar 2	29
Obr. 24 Graf hodnot tvrdosti svislého směru pro svar 2	30

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Plyny používané pro plazmové svařování [17]	13
Tab. 2 Teploty v plazmovém oblouku podle složení plazmového plynu [17]	13
Tab. 3 Chemické složení základního materiálu	24
Tab. 4 Mechanické vlastnosti základního materiálu při 20 °C	24
Tab. 5 Svařovací parametry	24
Tab. 6 Hodnoty tvrdosti pro vodorovný směr u svaru 1	27
Tab. 7 Hodnoty tvrdosti pro svislý směr u svaru 1	28
Tab. 8 Hodnoty tvrdosti pro vodorovný směr u svaru 2	29
Tab. 9 Hodnoty tvrdosti pro svislý směr u svaru 2	29